

ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体解析

清水 雅嗣*

Dynamic Process Simulator and Fluid Analysis of Pipeline System

Masatsugu Shimizu*

化学プラント向けダイナミックプロセスシミュレータおよびその応用システムである運転員訓練シミュレータ分野での管路系流体解析の応用について述べる。

Key word: 連成解析、流体解析、大規模解析

1. はじめに

株式会社オメガシミュレーションは、横河電機株式会社と三井化学株式会社との共同出資によって 1997 年に設立された化学プラント向けダイナミックプロセスシミュレータの専門会社である。主な業務内容は化学プラント向けのダイナミックプロセスシミュレータ Visual Modeler を核としたソフトウェアパッケージ群 OmegaLand の開発、販売ならびにその応用としての化学プラントの運転員向けの運転員訓練シミュレータの開発、販売である。

本稿では、上記のソフトウェアならびにシステムの機能と構成についての簡単に紹介をした上で、管路系流体解析の応用について述べる。

2. ダイナミックプロセスシミュレータ

化学プラントの設計を行う場合や操業中のプラントの状態を解析するような場合、プロセスフローシートシミュレータと呼ばれるソフトウェアが一般的に使用されている。

これは化学プラントを構成している蒸留塔、タンク、反応器、熱交換器、ポンプ、コンプレッサ、弁といった多種多様な装置や機器類の各々を機能単位モジュールとして、それらの機能単位モジュールをプラントの構成（プロセスフローシート）に従って組み合わせてプラント全体のシミュレ

ションモデルを作成するソフトウェアである。

経時的な変動を考えない定常状態のプラントの物質収支、熱収支のシミュレーションを行うものを定常状態プロセスシミュレータといい、Aspen Plus, HYSYS, PRO/II といった欧米で開発されたソフトウェアが市場の主流となっている。これらのソフトウェアは、歴史的には 1960 年代までさかのぼることができる実績のあるソフトウェアであり、化学プラントの設計における出発点となっている。

一方で、プラントのスタートアップ・シャットダウン、原料や製品仕様の変更、プラント負荷変更や異常発生などのさまざまな運転状態における圧力、流量、温度、組成などの経時変化のシミュレーションを行うものをダイナミックプロセスシミュレータという。ダイナミックプロセスシミュレータはプラントの機器設計・配管設計、プラントの運転状態解析、運転員訓練シミュレータ、プラント制御などさまざまに応用されている。

2.1. 機能構成

ダイナミックプロセスシミュレータは基本的には微分方程式と非線形連立方程式で表される大規模な方程式系の初期値問題を解くものであり、1990 年代終わり頃からの PC の能力向上と普及に伴い、急速に市場を広げているソフトウェアである。先に挙げた定常プロセスシミュレータのベンダーもそれぞれに対応したダイナミックプロセスシミュレータを市場に投入しており、弊社

*株式会社オメガシミュレーション 事業本部
Simulation Business Division, Omega Simulation Co., Ltd.

のようにダイナミックプロセスシミュレータを中心とした製品開発を行っているベンダーも海外では多くみられる。

現在市販されているダイナミックプロセスシミュレータは、おおむね以下のような機能構成となっている。

- (1) 化学プラントの多種多様な装置や機器の内部での現象を物質収支や熱収支の経時変化を表す物理化学的基礎式にもとづいて計算することのできるユニットモジュールライブラリ
- (2) プラントで扱う化学物質の熱力学的物性（蒸気圧、エンタルピー、密度など）や輸送物性（粘度、熱伝導度など）のライブラリならびに多様な化学物質の混合物の物性を計算する物性計算手法ライブラリ
- (3) 取り扱う化学物質の選択、物性計算手法の選択、ユニットモジュールライブラリから選んだユニットモジュールを組わせてプラントモデルの作成を容易に行うことができる GUI（グラフィックユーザインターフェイス）
- (4) プラントのシミュレーションモデルの全体のバランスを整合性のとれた状態で高速で計算することのできるソルバー

2.2. シミュレーションモデルの構築

ダイナミックプロセスシミュレータでシミュレーションモデルを作成する場合、プラントの装置や機器の寸法や特性データ、配置などがある程度設計されている必要がある。従って、図 1 上図に示すようなプラントの配管計装系統図（Piping and Instrumentation Diagram、P&ID）を基にしたシミュレーションモデルの構築が行われる。

図 1 下図に弊社のダイナミックプロセスシミュレータ Visual Modeler でプラントのシミュレーションモデルを構築する画面の例を示す。

P&ID と照らし合わせながら、装置や機器に相当するユニットモジュールをライブラリから選択して GUI 画面上に配置し、これを繋ぎあわせてプラントのシミュレーションモデルを構築していく。

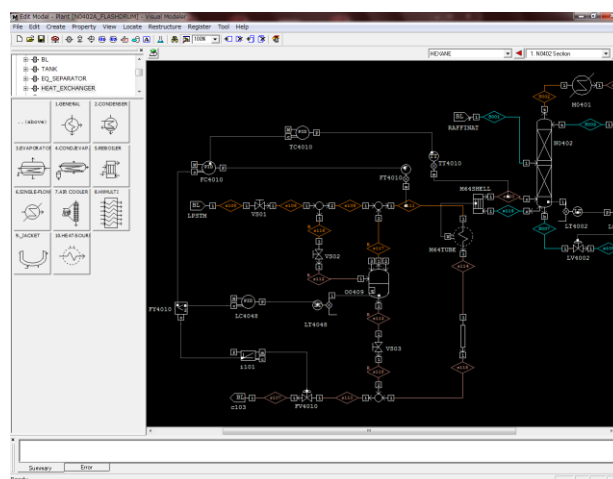
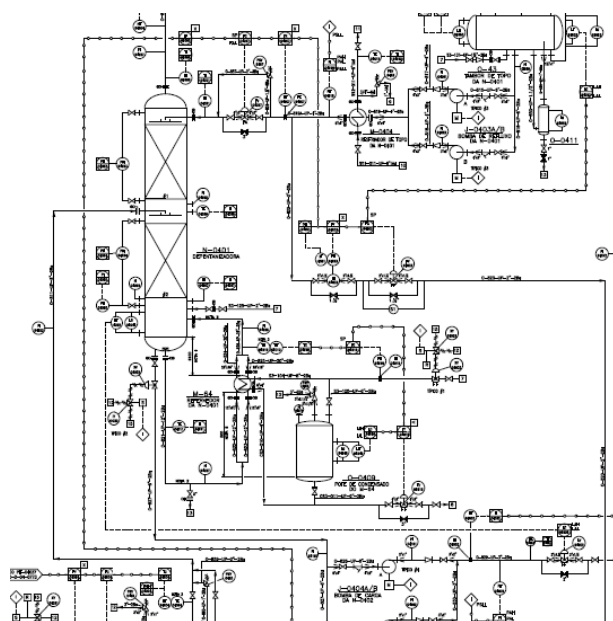


図 1 プラントの P&ID および Visual Modeler でのシミュレーションモデル作成

2.3. ダイナミックプロセスシミュレータによる化学プラントの設計検証

ダイナミックプロセスシミュレータは化学プラントの設計検証のツールとしてさまざまに使用されているが、代表的な例を以下に紹介するとともに管路系流体解析との関連を述べる[1]。

(1) 遠心圧縮機系統の安定性解析

遠心圧縮機には図 2 に示すようなサージ領域、ストーンウォール領域、最高回転数および最低回転数で囲まれた安定運転範囲があり、プラントのスタートアップ・シャットダウンやさまざまな運転変動時であっても、この運転範囲内に留まって

いるように制御されなければならない。このために遠心圧縮機吐出側から吸入側にガスを再循環させるアンチサージ系統などが具備されており、さまざまな運転状態に対して、この系統のアンチサージ弁の容量や動作速度、循環ガス冷却器の容量などが適正かどうかのシミュレーションによる検証が行われている。

一方、プラントの運転を行う側としては一旦サージ領域に入ってしまった場合、短時間で安定領域に戻ることができるようにして欲しいという要求がある。このためには、サージ領域に入った場合のシミュレーションも可能でなければならないが、サージ現象は遠心圧縮機単独で起こる問題ではなく、遠心圧縮機を含む配管系統全体の詳細なモデルでなければならない。しかしながら、現在のダイナミックプロセスシミュレータで、この問題を精度よく取り扱うことができるものではなく、今後、管路系流体解析技術との連成解析も検討すべきだろう。

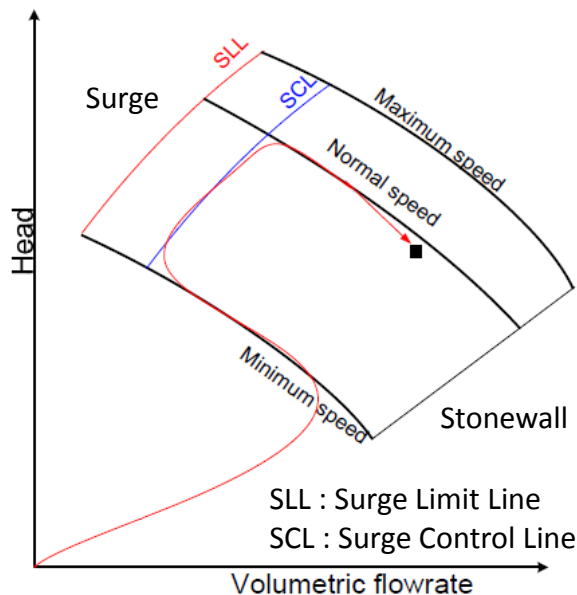


図 2 スタートアップ時の運転点の軌跡[1]

(2) フレア放出系統の設計容量の検証

何等かの異常が発生した場合に、化学プラントの装置や機器内にガスなどが滞留したままでは爆発事故にまで発展してしまうような事態を避けるため、フレア放出系統が具備されている。

図 3 上図はこのようなフレア放出系統の例で、

図 3 下図のような化学プラント内の蒸留塔、反応器、中間槽などに具備されている放出弁からの放出配管がヘッダー配管にまとめられて、フレアスタックに接続されている。

このようなフレア放出系統への放出量の推定、各ユニットからの放出量に対応したヘッダー配管系統の設計、放出弁容量の適正化などの目的でさまざまな状況を想定したケーススタディが行われている。

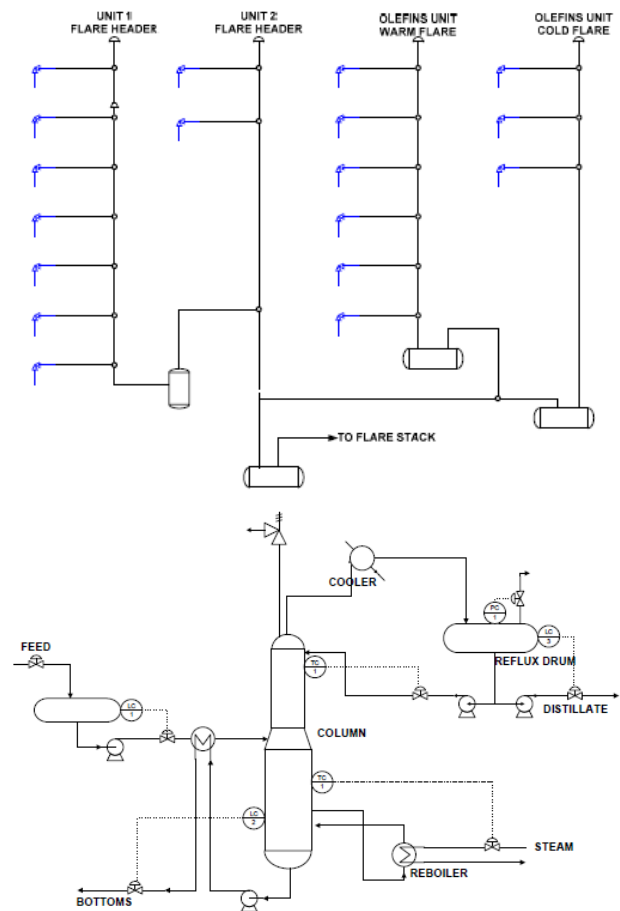


図 3 フレア放出系統の例[1]

図 3 下図のような放出元のさまざまな装置や機器の状態のシミュレーションはダイナミックプロセスシミュレータの得意とするところであるが、図 3 上図のようなフレアヘッダー配管系統では臨界流を考慮する必要があるなど、一般的にダイナミックプロセスシミュレータ内に用意されている配管系ユニットモデルでは不十分なことが多い。

そのため、PIPESYS や PIPEPHASE などの管路系流体解析ソフトウェアとダイナミックプロセスシミュレータとを組み合わせた連成解析が行われている。

図 4 は、3つのユニットから連続して放出があるというシナリオを想定してフレアスタックへの最大放出量の推定シミュレーションを行っている例である。

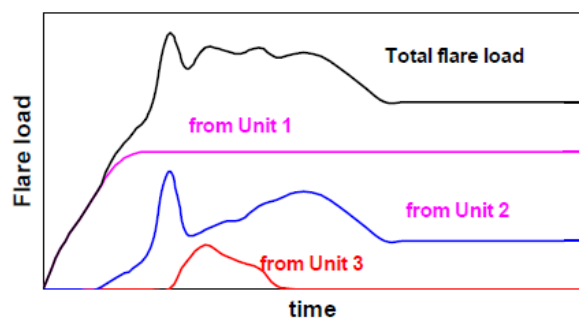


図 4 最大放出量の推定シミュレーション[1]

しかしながら、2つの異なるソフトウェアを使用して多様なケーススタディを行うのは煩雑であり、ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体解析で物性値などの整合性がない場合があるといった問題がある。そこでユーザーからはダイナミックプロセスシミュレータ側に管路系流体解析と同等のモデルが使えるようにという期待がよせられている。

3. 運転員訓練シミュレータ

ダイナミックプロセスシミュレータは前述のようにプラントの設計段階における設計検証ツールとして使われているが、もっとも広く使われている分野として運転員訓練シミュレータ (Operator Training Simulator、OTS) がある。

3.1. 化学プラント向け商用 OTS

商用 OTS は、原子力発電所への導入では 1970 年代までさかのぼる歴史があり、実際の発電所の制御室とそっくりそのままの環境を再現した OTS が各発電所に備えられている。しかしながら、このような大規模な OTS は非常に高価であり、一般的な化学プロセスに対して、個々のプラント

に合ったシミュレーションモデルを持った商用 OTS の展開はごく限られたものであった。

1990 年代終わり頃になって、ダイナミックプロセスシミュレータが PC 環境で比較的手軽に利用できるようになったことと、化学プラントの計装設備もかつてのようなアナログ計装およびパネル計器中心からデジタル計装および分散制御システム (Distributed Control System、DCS) による GUI ベースの運転が普及し、なおかつ DCS 自体も PC 環境でシステム構築・動作検証が可能になってきたことから、最近の化学プラント建設プロジェクトでは OTS が必須という状況となってきた。また新設の化学プラントだけでなく、既設の化学プラントにおいても、熟練運転員の退職による運転経験・知識の伝承の必要性和プラントの操業自体が安定してきたことによる新規運転員の経験不足を補う必要性和から、計装設備更新などの機会に OTS を導入することが一般的になってきている。

3.2. OmegaLand OTS の設置例

OTS においては、いかに大規模なプラントを対象としたシミュレーションモデルであっても運転員の操作に対してシミュレーションモデルからの応答が実時間で戻ってることが必須である。弊社の OTS ではエチレンプラントのような大規模なプラントを対象としてもパソコン 1 台で実時間シミュレーションが可能となっている。

また、訓練に臨場感を与えるためには、訓練生が操作や状態の確認を行うマンマシンインターフェイスは実際の制御室の環境と同一であることが望ましい。

図 5 は横河電機製 DCS の CENTUM システムと弊社の OmegaLand とを Windows PC のネットワークシステム上に構築した OTS の設置例である。手前側には指導員用 GUI の PC とシミュレーションモデル用の PC が並べられており、奥側には運転員操作卓が並べられている。

運転員操作卓は実際にプラントで使用される DCS のマンマシンインターフェイスと同一であり、実際と同じ画面で、プラント運転データの確

認、アラームの確認、運転のための画面操作やキーボード操作が可能となっている。

また、DCS 内部の制御演算や制御ロジックも実際に使用されるものと同一になっている。



図 5 OmegaLand OTS 設置例

3.3. LNG 受入基地向け OTS

弊社は設立当初から日本国内の主要なエチレンセンター、国内外の石油化学プラント向けに OTS の納入を行ってきたが、最近では、日本国内での産業構造の変化、エネルギー需給状況の変化から、LNG 受入基地（一次基地）向けの OTS 案件が増加している。

図 6 に LNG 受入基地の概略フロー図を示す。海外から LNG 船で運ばれてきた LNG は、受入配管を通じて LNG タンクに貯蔵される。

需要に応じて、LNG タンクから払い出された LNG は気化器でガス化され、プロパン等を混入して発熱量を規定値にした後、ガス漏洩が容易に検知できるように硫黄臭成分を付加されて需要先に送出される。

化学プラントとしては単純なフローであるが、主として集中定数系のユニットモデルを採用している現在のダイナミックプロセスシミュレータでは、巨大な LNG タンク内の挙動表現はもちろんのこと、LNG を扱う配管系統についても精度のよいシミュレーションが難しい事象が多い。以下に代表的な例について述べる。

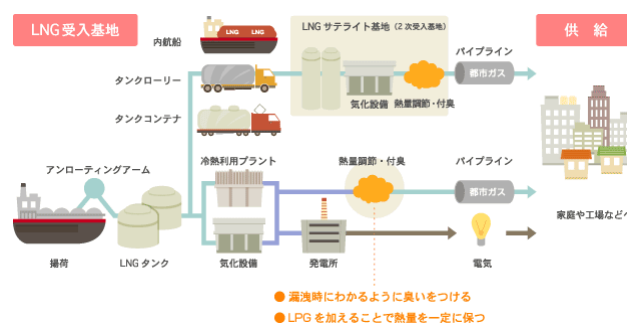


図 6 LNG 受入基地[2]

(1) 配管のクールダウン操作[3][4]

LNG は常圧で約 -162°C という低温であるため、常温状態の新設の LNG 配管系統に LNG を受け入れると大量のボイルオフガスが発生してしまう。また、少量の LNG を流す場合であっても大口径配管の場合は、配管下部と配管上部とで温度差が生じてしまい、bowing と呼ばれる変形を起こして、ガス漏洩を引き起こす可能性がある。

従って、LNG 受入の前に配管のクールダウン操作を配管の変形が許容値内かどうかを監視しながら慎重に時間をかけて行う必要がある。このような運転において、管路系流体解析による使用流体、流量パターンなどのケーススタディが有効である。図 7 は LNG 受入配管のクールダウンのシミュレーションの例である。

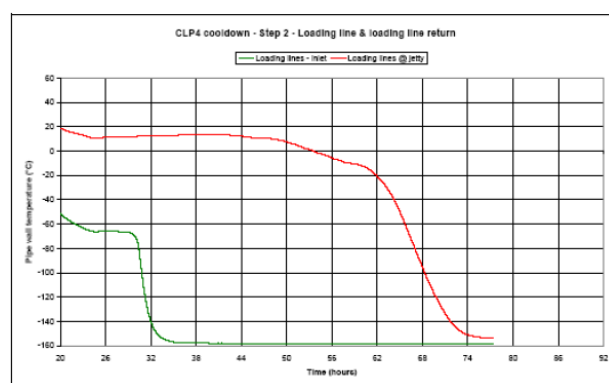


図 7 LNG 受入配管のクールダウン[4]

(2) LNG 配管の冷却保持

LNG 船からの LNG 受入は数日から数週間の間隔で行われる。また、LNG タンクからの払い出しも需要家の運転状況によって中断することがある。その間、LNG 配管は外気からの入熱を受

けて温度が上昇してしまうため、LNG の受入や払い出しを再開する際に、再び長時間をかけてクールダウン操作を行わなければならない。

この事態を避けるため、LNG 配管内に LNG を常時満たしておくが、単に LNG 配管内に LNG を満たしておくだけでは、外気からの入熱でボイルオフガスが発生してしまうため、LNG の蒸発を抑制するため、循環冷却方式、加圧冷却方式ならびにこれらを改良した各種の方式による冷却保持の運転が行われている[5]～[10]。

循環冷却方式は、受入配管に循環用配管を接続して、LNG タンクから循環ポンプによって LNG を循環させることにより入熱を吸収する方式である。加圧冷却方式は、LNG 配管の途中に立ち上がり配管部を設けて、水平管部に LNG 液面を形成し、LNG 液面上のガス圧力および立ち上がり配管部の液ヘッドにより LNG 配管内の LNG を加圧して、LNG 蒸発抑制する方式である。

循環冷却方式では循環ポンプの運転コストが問題であり、循環を停止すると配管立ち上がり部でガイザリングと呼ばれる現象が発生する可能性がある。図 8 はガイザリングの発生メカニズムを示したもので、入熱による気泡の発生、気泡の成長による液の持ち上がりとその後の気泡の吹き抜けによる液の落下というサイクルの繰り返りで配管系に振動が発生する現象である。

加圧冷却方式では、休止期間が長い場合には、LNG 中の軽質成分が気化して配管内 LNG の重質化が起こり、冷却能力の低下を招くという問題がある。また、このような重質化が払い出し系統で起こると気化器から送出されるガスの発熱量が一時的に高くなってしまうという問題がある。

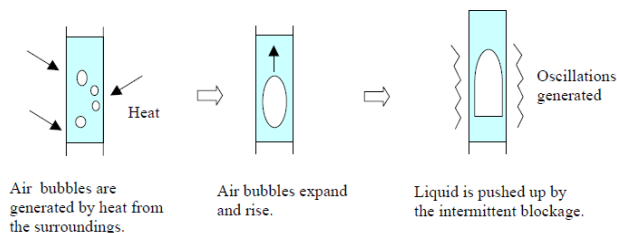


図 8 LNG 配管でのガイザリング現象[3]

上記のような配管系統での熱移動ならびに気液二相流の問題への管路系流体解析の応用は、よ

り安定した運転方法および制御系改善の検討する上で有効である。

4. まとめ

OTS に組み込まれる DCS システムが実際にプラントで使われるものと同一であることから、OTS を運転員訓練だけでなく、プラント運転方法の改善、制御ループのチューニングや制御ループ改善の検証システムとして使用するという考え方も定着してきている。

従って、プラントのシミュレーションモデルもより広範な事象を表現でき、かつ、より精度の高いものが求められており、ダイナミックプロセスシミュレータにおいても管路系流体解析といった技術との融合が望まれている。

*Visual Modeler、OmegaLand は株式会社オメガシミュレーションの登録商標である。

*CENTUM は横河電機株式会社の登録商標である。

*Windows、Aspen Plus、HYSYS、PRO/II、PIPESYS、PIPEPHASE は各ソフトウェアベンダーの商標または登録商標である。

参考文献

- [1] Vinod Patel, Jeffrey Feng, Surajit Dasgupta, Jack Kramer "Use of Dynamic Simulation in the Design of Ethylene Plant", Proceeding of The 20th Ethylene Producers' Conference, 2008 AIChE Spring Meeting & 4th Global Congress on Process
- [2] 大阪ガス株式会社ホームページ
www.osakagas.co.jp
- [3] Takayuki Morise, Yutaka Shirakawa, Toshihiro Meguro "APPLYING OPTIMUM COMMISSIONING TECHNOLOGY OF LNG RECEIVING TERMINALS", PO-48, 2007 Conference LNG 15
- [4] Tania Simonetti, Dominique Gadelle, Rajeev Nanda "USING CFD AND DYNAMIC SIMULATION TOOLS FOR

THE DESIGN AND OPTIMIZATION OF
LNG PLANTS”, October 2009 24th World
Gas Conference

- [5] 特許公開平 7-119893
- [6] 特許公開 2001-200996
- [7] 特許公開 2007-292182
- [8] 特許公開 2007-298052
- [9] 特許公開 2008-51287
- [10] 特許公開 2011-149485

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)